

基于VSC-MTDC的大规模海上风电并网系统 协调下垂控制方法

彭衍建,李勇,曹一家

(湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要: 提升电压源型换流器的多端直流输电(VSC-MTDC)系统的传输功率和传输效率对于大规模风电并网而言至关重要。提出VSC-MTDC系统协调下垂控制方法,并制定3种典型的控制模式,从而实现风电场最优功率输送与VSC-MTDC系统效率的最大化。建立用于海上风电场并网的四端直流输电系统仿真模型,结果表明,所提协调下垂控制方法不仅能实现有功功率在VSC-MTDC系统中的最优分配,而且能稳定直流电压,增强VSC-MTDC系统的运行稳定性。

关键词: VSC-MTDC; 海上风电场; 下垂控制; 有功功率分配; 风电; 并网

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.08.003

0 引言

海上风电由于风能丰富、利用率高、占地少等优点,已经成为现代风电发展的一个重要方向^[1-2]。随着海上风电场的不断发展,海上风电装机容量也逐渐增加,我国规划到2020年底,实现海上风电场装机容量达30 GW。目前海上风电一般采用交流输电方式将电能输送至陆上交流电网,主要优点是系统可靠性高、结构简单、技术成熟^[3]。但是当海上风电场离岸较远时,使用基于电压源换流器的直流输电技术VSC-HVDC(Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current system)的传输成本要远远低于交流输电,同时由于VSC-HVDC并网方式还可以抑制风电场的功率波动,因此将是未来风电并网的发展趋势^[4-6]。由于受到海上风资源及水深等因素限制,海上风电场多分布于不同的海域。此外,陆上功率接受端由于受负荷中心所在的地理位置等因素限制,也多分布在不同区域^[7]。因此两端输电系统已经不能满足大规模海上风电并网的需要,可实现多电源供电、多落点受电的多端直流柔性输电(VSC-MTDC)系统为大规模海上风电场提供了一种更为灵活的电能输送与并网方式,从而更有效地解决海上风电并网消纳问题^[8-10]。

目前对于VSC-MTDC系统应用于海上风电场

收稿日期:2015-07-06;修回日期:2016-05-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51520105011);湖南省科技重大专项(2015GK1002);国网湖南省电力公司项目(5216-A213509X);国家电网公司科学技术项目(面向智慧城市的智能电网园区能源优化管理关键技术研究与应用)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51520105011),Key S & T Special Project of Hunan Province of China(2015GK1002),Project of Hunan Power Company of State Grid(5216A213509X) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Research and Application of Key Technologies in Smart Grid Park Energy Management and Optimization for Smart City)

连接陆上电网的研究主要集中在系统的暂态稳定方面,而VSC-MTDC系统稳定运行的前提是维持系统直流电压的稳定^[11-18]。文献[12-13]研究了VSC-MTDC系统的直流电压斜率控制方法,利用给定的多换流站的直流电压-电流特性,实现多个换流站共同承担直流电压控制的目标,然而并未考虑到系统的传输损耗。文献[14]提出了一种不需要站间通信的直流电压下垂控制方法,并且将直流电缆的电压下降对直流功率传输平衡的影响考虑在内,从而提高系统的传输效率。文献[15]提出了一种利用下垂控制原理提高VSC-MTDC系统传输功率的控制策略,然而并没有考虑直流电缆电阻对传输效率的影响。文献[16]提出了一种将电压裕度与斜率相结合作为控制目标的新型控制策略,实现了VSC-MTDC系统的多级直流电压稳定控制。文献[17-18]提出了基于直流电压偏差的协调控制策略,介绍了3种控制模式,但是并未涉及风电场参与系统协调控制的研究。

本文提出一种应用于含大规模海上风电场的VSC-MTDC系统协调下垂控制方法,根据海上风电场输出功率大小制定了3种控制模式,并分别计算了不同控制模式时电网侧电压源型换流器的下垂系数。通过对电网侧电压源型换流器的协调下垂控制将有功功率的分配与系统调度结合起来,以实现大规模风电的最优功率输送与并网系统运行效率的提升。最后通过一个含大规模海上风电场的四端VSC-MTDC系统验证所提控制方法的有效性。

1 VSC-MTDC 协调下垂控制机理分析

1.1 典型四端 VSC-MTDC 系统

本文以一个含大规模海上风电场的四端VSC-MTDC系统为例进行研究,拓扑结构见图1。其中包含了2个不同海域的风电场侧送端换流站WFVSC

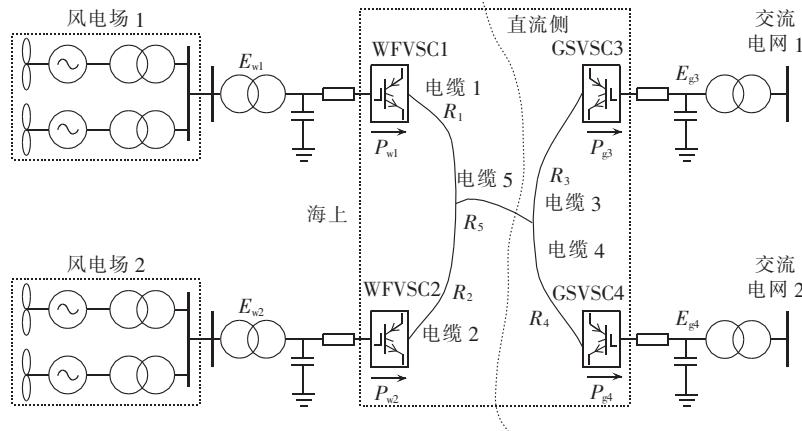


图1 海上风电场的多端直流输电系统
Fig.1 MTDC system of offshore wind farm

(Wind Farm side VSC)、2个不同区域的陆地电网侧受端换流站 GSVSC(Grid Side VSC)以及直流输电线路。

2个不同海域的风电场发出的功率分别通过直流输电线路1和2传送到汇集电缆5,再通过输电线路3和4传输至2个GSVSC,从而将风电功率输送至2个不同区域的交流电网。

1.2 协调下垂控制机理

图1所示系统在运行时,由于风速波动的特点,风电场的输出功率也随机变化,因此WVFSC的控制灵活性较低,并不适用于参与系统的协调控制。因此本文主要通过对2个GSVSC的协调下垂控制来完成风电功率的最优传输。图2所示为GSVSC3和GSVSC4的U-I特性曲线。

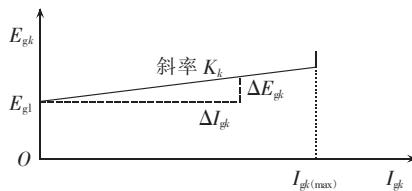


图2 GSVSC的U-I特性
Fig.2 U-I characteristic of GSVSC

根据图2可知,当流通GSVSC3和GSVSC4的电流小于各自的最大限值($I_{gk} < I_{gk(\max)}$)时,有下式成立:

$$K_k = \frac{\Delta E_{gk}}{\Delta I_{gk}} \quad (1)$$

其中, $\Delta E_{gk} = E_{gk} - E_{gl}$, $\Delta I_{gk} = I_{gk}$ ($k = 3, 4$); K_k 为第k个GSVSC的下垂控制常数; $I_{gk(\max)}$ 为流过第k个GSVSC的最大限制电流; E_{gl} 为VSC-MTDC系统的空载电压。

当流通GSVSC3和GSVSC4的电流超出各自设定的最大限值($I_{gk} \geq I_{gk(\max)}$)时,有 $I_{gk} = I_{gk(\max)}$ 成立。

综上所述,可以得到流过GSVSC3和GSVSC4的电流表达式为:

$$I_{gk} = \begin{cases} (E_{gk} - E_{gl}) / K_k & I_{gk} \leq I_{gk(\max)} \\ I_{gk(\max)} & I_{gk} > I_{gk(\max)} \end{cases} \quad (2)$$

图3所示为VSC-MTDC系统的稳态等效电路。其中, R_1-R_5 分别代表5条直流输电线路的等效电阻; E_{wl} 、 E_{w2} 、 I_{wl} 、 I_{w2} 和 E_{g3} 、 E_{g4} 、 I_{g3} 、 I_{g4} 分别表示2个WVFSC和2个GSVSC的直流电压与电流; K_3 、 K_4 分别表示GSVSC3和GSVSC4的下垂系数,用可变虚拟电阻表示。根据式(1)可以计算出GSVSC3和GSVSC4的下垂控制系数。通过改变 K_3 、 K_4 的大小,实现对2个GSVSC下垂系数的协调控制,进而实现功率最优传输。2个GSVSC的下垂系数变化特性如图4所示。

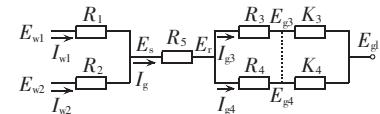


图3 四端直流输电系统的稳态等效电路图
Fig.3 Steady-state equivalent circuit of four-terminal VSC-HVDC system

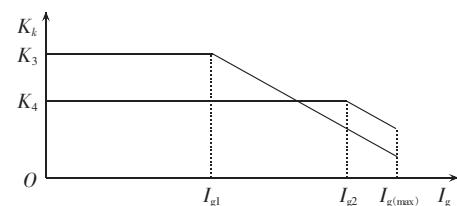


图4 下垂系数变化特性
Fig.4 Variation characteristic of droop gains

由图4可知,当流过GSVSC的电流满足 $I_g < I_{gl}$ 时,GSVSC3和GSVSC4的下垂系数恒定不变,此时输电线路3和4输送风电功率比例为定值;当 $I_{gl} \leq I_g \leq I_{g2}$ 时,GSVSC3的下垂系数为变量而GSVSC4的下垂系数保持恒定,此时输电线路3输送风电功率随总电流增大而增加,而输电线路4输送的风电功率保持恒定;当 $I_{g2} < I_g < I_{g(\max)}$ 时,GSVSC3和GSVSC4的下垂系数均为变量,此时输电线路3和4按照新的比例输送风电功率。

2 协调下垂控制模式

针对VSC-MTDC系统中大规模风电场受风速波

动影响导致风电出力不同的情况,本文提出了适用于2个GSVSC的协调下垂控制方法,并相应地制定出3种控制模式,从而实现海上风电功率向负荷中心的最优传输。

2.1 模式1:优先控制模式

首先设定GSVSC4具有输送功率的优先权,其U-I特性如图5所示。在该控制模式下,如果海上风电场输送的总有功功率小于其设定值,风电功率就会优先通过GSVSC4来传输,并且在GSVSC4的作用下维持直流电压稳定,而此时GSVSC3并不传输风电功率。如果海上风电场输送的总有功功率大于其设定值,那么GSVSC4的电流将达到其最大值并维持不变,电压值随系统的电压变化而改变;此时,GSVSC3用来输送额外的有功功率,其电流和电压值均在一定限值内不断增大。图6所示为模式1的控制框图。

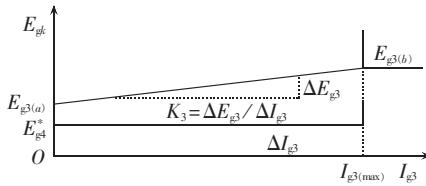


图5 模式1中GSVSC3/4的U-I特性

Fig.5 U-I characteristic of GSVSC3/4 in mode 1

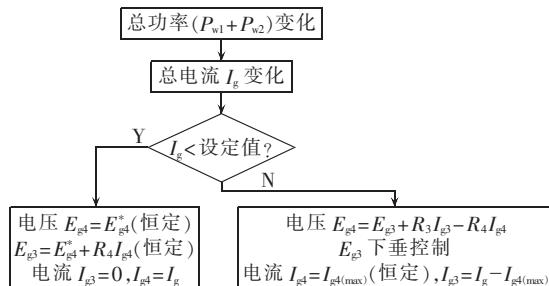


图6 模式1中GSVSC3/4控制框图

Fig.6 Block diagram of GSVSC3/4 control in mode 1

上文提到,用虚拟可变电阻来代替下垂系数,模式1下虚拟可变电阻 K_3 的设计如下。首先设定GSVSC4所允许通过的最大电流值为 $I_{g4(\max)}$,流入汇集输电线路5的总电流为 I_g 。当 $I_g \leq I_{g4(\max)}$ 时,虚拟可变电阻 K_3 为无穷大电阻(本文取10000Ω),此时电流全部由GSVSC4流过;当 $I_g > I_{g4(\max)}$ 时,GSVSC4流过的电流恒为 $I_{g4(\max)}$,此时根据基尔霍夫电流定律可得虚拟电阻 K_3 的值为:

$$K_3 = \frac{I_{g4(\max)}}{I_{g3}} (R_4 + K_4) - R_3 \quad (3)$$

此外,GSVSC3还可以稳定直流电压。

2.2 模式2:最优控制模式

GSVSC3和GSVSC4按照一定的比例输送有功功率至各自的负荷中心。在系统运行过程中,通过改

变受端换流器直流电压的下垂特性来控制流入GSVSC3和GSVSC4的电流均不超过所允许流过的最大电流。GSVSC3和GSVSC4的U-I特性如图7所示。其中空载电压相同,且GSVSC3的下垂系数大于GSVSC4的下垂系数。

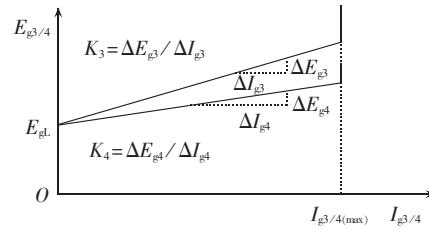


图7 模式2中GSVSC3/4的U-I特性

Fig.7 U-I characteristic of GSVSC3/4 in mode 2

有功功率传输最优也就是使VSC-MTDC系统中受端的有功功率损耗最小。根据图3可列出电压方程式:

$$E_r = E_{g3} + I_{g3}R_3 \quad (4)$$

$$E_r = E_{g4} + (I_g - I_{g3})R_4 \quad (5)$$

有功功率的损耗主要指输电线路的铜损耗,其表达式为:

$$P_c = R_3 I_{g3}^2 + R_4 (I_g - I_{g3})^2 \quad (6)$$

对式(6)中的 I_{g3} 进行求导,并且令 $P'_c(I_{g3})=0$,可得到 I_{g3} 的表达式:

$$I_{g3} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} I_g \quad (7)$$

同理可得:

$$I_{g4} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} I_g \quad (8)$$

由于受端换流器的直流电压相等,即满足 $E_{g3} = E_{g4}$ 。根据式(4)和(5)可得直流电压 E_{g3} 和 E_{g4} 的表达式:

$$\begin{cases} E_{g3} = E_r - R_3 I_{g3} = E_{gl} + K_3 I_{g3} \\ E_{g4} = E_r - R_4 I_{g4} = E_{gl} + K_4 I_{g4} \end{cases} \quad (9)$$

4个VSC换流站直流侧有功功率可由下式来计算:

$$\begin{cases} P_1 = E_{w1} I_{w1} \\ P_2 = E_{w2} I_{w2} \\ P_3 = E_{g3} I_{g3} \\ P_4 = E_{g4} I_{g4} \end{cases} \quad (10)$$

综合式(9)和(10),可进一步得出GSVSC3和GSVSC4的最优功率传输比例:

$$n = \frac{P_3}{P_4} = \frac{I_{g3}}{I_{g4}} = \frac{R_4}{R_3} = \frac{K_4}{K_3} \quad (11)$$

GSVSC4的下垂控制方式与GSVSC3类似,只是其转折电流更大,在其下垂系数由恒定值转为变量时,其总电流已超过输电线路所允许流通的最大电流值,故可忽略GSVSC4的下垂控制,因此GSVSC4的下垂系数为恒定值。GSVSC3/4的下垂控制流程如

图8所示。

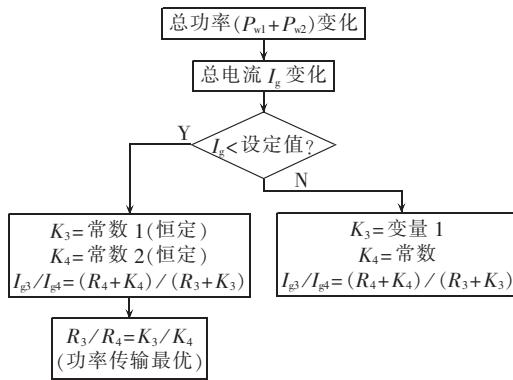


图8 模式2中GSVSC3/4的控制框图

Fig.8 Block diagram of GSVSC3/4 control in mode 2

模式2的下垂系数按以下过程进行设计。设定 GSVSC3/4 所允许通过的最大电流为 $I_{g3/4(\max)}$, 当电流 I_g 较小时, GSVSC3/4 的下垂系数均为恒定值, 总电流按照一定的比例流入 GSVSC3 和 GSVSC4。随着 I_g 的增大(假设 $R_3 > R_4$), GSVSC4 先达到电流限值 $I_{g3/4(\max)}$, 此时 $I_g = I_{g\lim}$ 。为了使功率在该阶段实现最优分配, K_3 和 K_4 应该满足:

$$K_{3(1)} = \frac{R_3}{R_4} K_4 \quad (12)$$

若总电流 I_g 继续增大, GSVSC3 的下垂系数转化为变量, 以保证流过 GSVSC4 的电流恒为 $I_{g3/4(\max)}$, 直到流过 GSVSC3 的电流也达到限值, 即 $I_{g3} = I_{g3/4(\max)}$, 此时总电流 $I_g = 2I_{g3/4(\max)}$, 在该阶段下垂系数 K_3 可由下式计算得到:

$$K_{3(2)} = R_4 + K_4 - R_3 \quad (13)$$

总电流 I_g 在 $I_{g\lim}$ 至 $2I_{g3/4(\max)}$ 阶段时, 由于 GSVSC4 的电流已经达到限值, 此时仅能对 GSVSC3 采用下垂控制, 结合式(12)、(13)得到下垂系数 K_3 与 I_g 的关系为:

$$K_3 = kI_g + b \quad (14)$$

$$k = \frac{K_{3(2)} - K_{3(1)}}{2I_{g3/4(\max)} - I_{g\lim}} \quad (15)$$

$$b = \frac{2K_{3(1)}I_{g3/4(\max)} - K_{3(2)}I_{g\lim}}{2I_{g3/4(\max)} - I_{g\lim}} \quad (16)$$

2.3 模式3:混合控制模式

将模式1与模式2相结合可构成新型混合控制模式, 即模式3。首先设定 GSVSC4 优先输送的风电功率限值为 $P_{\max4}$, 如果传输功率超过 $P_{\max4}$, GSVSC3 和 GSVSC4 再按比例分配输送的风电功率。具体控制框图如图9所示。

可见在模式3中, GSVSC4既可以作为下垂控制器控制输送的有功功率, 也可以作为电压控制器来稳定直流电压, 而 GSVSC3 仅作为下垂控制器参与系统功率的协调分配。GSVSC3 和 GSVSC4 的下垂系数设计如下。

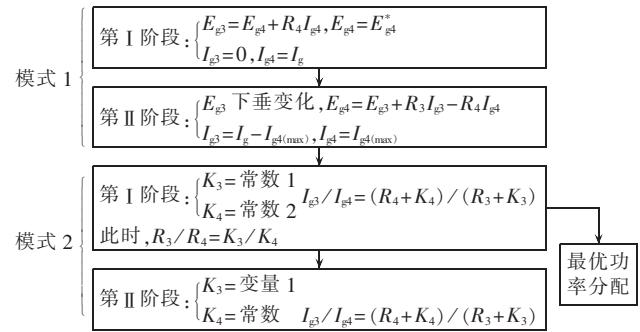


图9 模式3中GSVSC3/4的控制框图

Fig.9 Block diagram of GSVSC3/4 control in mode 3

(1)当 $I_g \leq I_{g1}$ 时, 系统工作于模式1的第I阶段, 此时 GSVSC3 不工作, 电流全部流过 GSVSC4, 因此此时设置接入输电线路3的虚拟可变电阻 K_3 无穷大。

(2)当 $I_{g1} < I_g < I_{g2}$ 时, 系统工作于模式1的第II阶段, 此时流过 GSVSC4 的电流 $I_{g4} = I_{g1}$, 流过 GSVSC3 的电流为 $I_{g3} = I_g - I_{g1}$, 因此根据式(17)可得到接入输电线路3的虚拟电阻 K_{30}

$$\frac{R_3 + K_3}{R_4 + K_4} = \frac{I_{g4}}{I_{g3}} \quad (17)$$

(3)当 $I_{g2} \leq I_g \leq I_{g3}$ 时, 系统工作于模式2的第I阶段。GSVSC3 和 GSVSC4 共同承担风电功率传输的任务, 此时下垂系数 K_3 为恒定值, 且满足式(13), 因此系统处于功率最优分配模式。

(4)当 $I_g > I_{g3}$ 时, 系统工作于模式2的第II阶段。此时下垂系数 K_3 为变量, 直到总电流达到最大限值。

控制模式1和控制模式2相结合而形成了控制模式3, 因此在模式3中涉及2个模式的切换, 其主要依据是判断流入 GSVSC3 和 GSVSC4 的总电流 I_g 的大小, 控制流程图如图10所示。

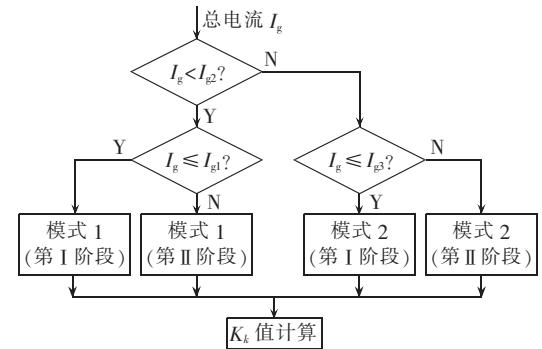


图10 模式切换流程图

Fig.10 Flowchart of mode switchover

本文研究的用于海上风电功率送出的四端 VSC-MTDC 系统中 GSVSC 采用定直流电压控制方式作为主控制模式, 将协调下垂控制作为辅助控制模式。由图10可知, 根据流入受端换流器总电流大小可以决定 GSVSC 的工作模式, 并计算出 GSVSC 的下垂控制系数。根据图10, 可以进一步得出 GSVSC 的

控制框图,如图11所示。根据流入GSVSC总电流 I_{dc} 的变化,分别计算相应的下垂系数 K_k ,再经过 I_{dc} 与 K_k 的作用得到各直流电压的给定偏差值 $\Delta E_{dc,kref}$,之后与给定电压值 $E_{dc,kref}$ 、实测电压 $E_{dc,kmeas}$ 相比较得到对应的电压偏差 ΔE_k ,最后通过PI调节得到GSVSC的有功电流参考值 i_{dkref} 。此外还通过给定值 Q_{kref} 和实测值 Q_{kmeas} 的比较得到 ΔQ_k ,最后经过PI调节得到无功电流参考值 i_{qkref} 。将GSVSC3和GSVSC4的有功、无功电流参考值输入到相应GSVSC的控制系统,从而达到协调控制2个GSVSC的目的。

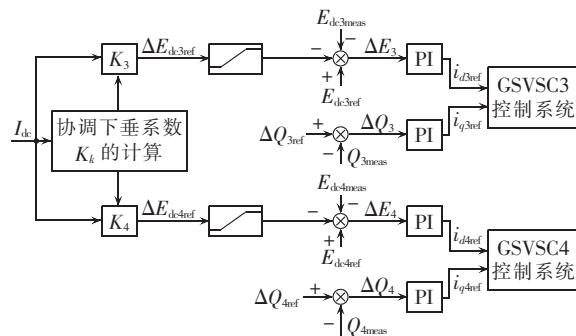


图11 协调下垂控制框图

Fig.11 Block diagram of coordinated droop control

2.4 3种控制模式对比分析

对比3种控制模式可得,随着总电流的变化,下垂系数也发生变化,从而使系统处于不同功率分配模式,以满足实际控制需求。3种控制模式的对比结果如表1所示。

表1 3种控制模式对比

Table 1 Comparison among three control modes

模式	控制目标	协调控制结构	适用场所
1	优先控制 功率分配	GSVSC3作为下垂控制器, GSVSC4作为电压调节器	GSVSC3作为备用线路, 功率超过一定值时负荷由此线路分流
2	最优控制 功率分配	GSVSC3作为下垂控制器, GSVSC4作为下垂控制器	功率较小时2条线路损耗最小
3	优先控制 功率分配转 最优控制 功率分配	GSVSC3作为下垂控制器, GSVSC4作为下垂控制器兼电压控制器	负荷波动较大时 GSVSC3作为备用线路, 且功率超过一定值时, 本模式可保证线路总传输功率损耗最小

3 仿真与分析

3.1 系统参数

图3所示四端VSC-MTDC系统中,5条直流输电线路的等值参数如表2所示。本文所用VSC-MTDC系统中GSVSC和WVFSC的额定功率均为500MW,直流母线电压为400kV,允许流过的最大直流电流均为1250A。上文提到的空载电压 $E_{gl}=400$ kV,系统传输的风电总功率为100MW。下垂系

表2 直流电缆的等值参数

Table 2 Equivalent parameters of DC cables

线路	R/Ω	L/mH	C/μF	线路	R/Ω	L/mH	C/μF
1	1.0	10	11.0	4	0.8	8	8.8
2	1.5	15	16.5	5	2.0	40	44.0
3	1.2	12	13.2				

数初始值 $K_3=15.55$ 、 $K_4=10.37$ 。

3.2 风速突变时的仿真结果与分析

3.2.1 模式1仿真结果

结合图1所示的四端VSC-MTDC系统,根据表2所给的参数在MATLAB/Simulink中建立了仿真模型。直流输电线路4的电压初始值 $E_{g4}^*=12.9$ kV;直流输电线路3的初始电压 $E_{g3}=13.0$ kV(略大于 E_{g4}^*)。其中WVFSC的输出电流随风速变化情况如表3所示。

表3 WVFSC的电流变化情况

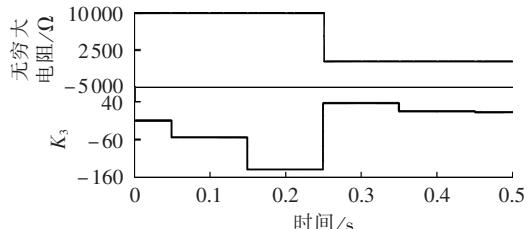
Table 3 Variation of WVFSC current

时间/s	I_{w1}/A	I_{w2}/A	时间/s	I_{w1}/A	I_{w2}/A
0	0	0	0.25	1000	650
0.05	500	500	0.35	1250	1000
0.15	500	650	0.45	1250	1250

由上文分析可知流过GSVSC的最大直流电流为1250A,因此当 $I_g \leq 1250$ A时, $I_{g4}=I_g$, $I_{g3}=0$, $E_{g4}=12.9$ kV;当 $I_g > 1250$ A时, $I_{g4}=1250$ A, $I_{g3}=I_g-1250$, E_{g4} 随 E_{g3} 的变化而变化。

图12为无穷大电阻和下垂控制常数 K_3 的变化规律。图13和14分别是VSC-MTDC系统中电流和电压(标幺值,后同)的变化情况。由仿真结果可知,在0.25s时总电流 I_g (I_{w1} 与 I_{w2} 之和)超过1250A。因此在0.25s之前风电功率全部经过GSVSC4传输至交流电网2,并且GSVSC4的电压在0.25s之前也一直保持给定值。在0.25s时GSVSC3开始参与传输风电功率,即有电流通过GSVSC3,通过GSVSC4的电流一直维持在1250A。0.25s后GSVSC4的电压随GSVSC3电压变化而变化,0.25s后下垂控制常数 K_3 的变化情况如表4所示。

根据表3海上风电场输出总电流的变化,结合3.1节中 I_{g3} 与 I_{g4} 关系可得电流 I_{g3} 的变化值分别为:0、400A、1000A、1250A。图12所示的随 K_3 改变的

图12 模式1中无穷大电阻和下垂系数 K_3 变化情况Fig.12 Variation of infinite resistance and K_3 in mode 1

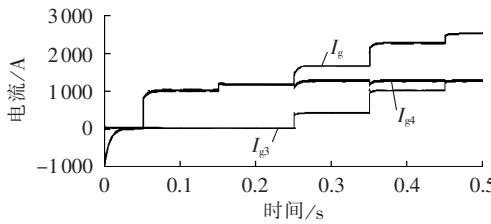


图 13 模式 1 中电流 I_g 、 I_{g3} 和 I_{g4} 变化情况
Fig.13 Variation of I_g , I_{g3} and I_{g4} in mode 1

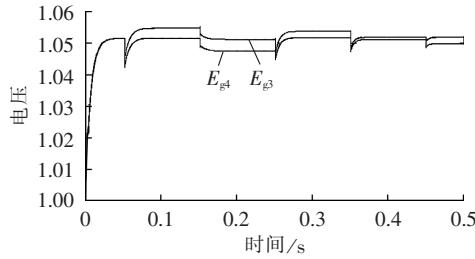


图 14 模式 1 中电压 E_{g3} 和 E_{g4} 变化情况
Fig.14 Variation of E_{g3} and E_{g4} in mode 1

表 4 模式 1 中 K_3 在不同时间段的变化情况
Table 4 K_3 for different time periods in mode 1

时间段/s	K_3	时间段/s	K_3
0.25~0.35	33.70	0.45~0.50	9.97
0.35~0.45	12.76		

流过各 VSC 的电流值与理论分析完全一致。由图 14 可知,在 0.25 s 前 GSVSC4 的电压为 12.9 kV,0.25 s 后随 E_{g3} 变化而变化,且电压最大偏差不超过 6%,从而直流电压可以稳定在合理范围内,与理论分析一致。

3.2.2 模式 2 仿真结果

直流输电线路 3、4 允许通过的最大电流 $I_{3/4(\max)}=1250$ A。根据 2.2 节中的分析可知在模式 2 控制下,当 $I_g \leq 2083$ A 时, $I_{g3}/I_{g4}=2/3$; 当 $I_g > 2083$ A 时, $I_{g4}=1250$ A, $I_{g3}=I_g-1250$ 。

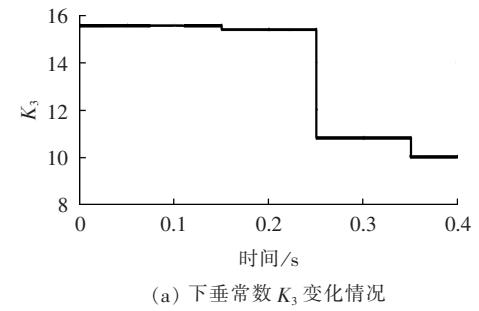
海上风电场输出电流变化情况如表 5 所示,模式 2 控制下的仿真结果如图 15 所示。

由表 5 可知,0.25 s 之前风电场输出总电流不超过 2083 A,此时流过 GSVSC3 和 GSVSC4 的电流分配比例为 2:3,之后比例逐渐增大,直至 0.35 s 时,流过 GSVSC3 和 GSVSC4 的电流都达到限值,下垂控制常数 K_3 值变化规律如表 6 所示。

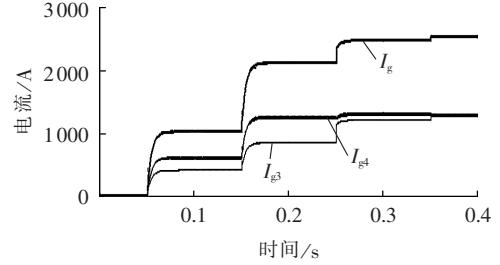
电流 I_{g3} 、 I_{g4} 变化值分别为:400 A、600 A;833 A、1250 A;1187 A、1250 A;1250 A、1250 A。由图 15 可知,系统的直流电压随电流的变化而变化,且最大值不超过 1.05 p.u.,因此通过协调下垂控制可以稳定系

表 5 模式 2 中 WFVSC 的电流变化情况
Table 5 Variation of WFVSC current in mode 2

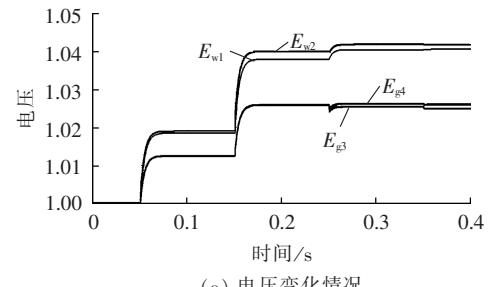
时间段/s	I_{w1} /A	I_{w2} /A	时间段/s	I_{w1} /A	I_{w2} /A
0	0	0	0.25	1187	1250
0.05	500	500	0.35	1250	1250
0.15	833	1250			



(a) 下垂常数 K_3 变化情况



(b) 电流 I_g 、 I_{g3} 和 I_{g4} 变化情况



(c) 电压变化情况

图 15 模式 2 中风速突变仿真结果
Fig.15 Simulative results of wind speed mutation in mode 2

表 6 模式 2 中 K_3 在不同时间段的变化情况
Table 6 K_3 for different time periods in mode 2

时间段/s	K_3	时间段/s	K_3
0.05~0.15	15.55	0.25~0.35	10.81
0.15~0.25	15.55	0.35~0.50	9.97

统的直流电压。

3.2.3 模式 3 仿真结果

与模式 2 相同,直流输电线路 3、4 允许通过的最大电流均为 $I_{3/4(\max)}=1250$ A,GSVSC4 的初始电压 $E_{g4}^*=0.6$ kV。设定模式 1 和模式 2 的分界电流为 $I_g=1000$ A,模式 1 内部的分界电流为 $I_g=600$ A,模式 2 内部的分界电流为 $I_g=2083$ A。因此可得出:当 $I_g \leq 600$ A 时, $I_{g4}=I_g$, $I_{g3}=0$; 当 600 A < $I_g < 1000$ A 时, $I_{g4}=600$ A, $I_{g3}=I_g-600$; 当 1000 A ≤ $I_g \leq 2083$ A 时, $I_{g3}/I_{g4}=2/3$; 当 $I_g > 2083$ A 时, $I_{g4}=1250$ A, $I_{g3}=I_g-1250$ 。

风电场侧输出电流变化情况如表 7 所示。由 2.3 节可以计算出下垂系数 K_3 的值,如表 8 所示。模式 3 的仿真结果如图 16 所示。

由 K_3 的变化情况可得出流过 GSVSC3、GSVSC4 的电流值分别为:0,500 A;100 A,600 A;300 A,600 A;400 A,600 A;560 A,840 A;833 A,1250 A;1250 A,

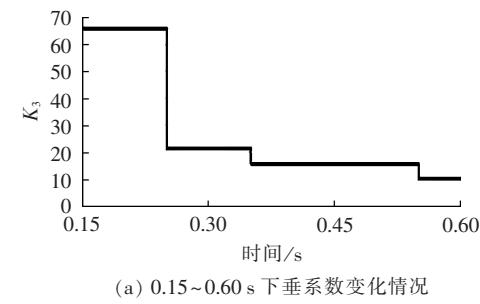
表7 模式3中WFVSC的电流变化情况

Table 7 Variation of WFVSC current in mode 3

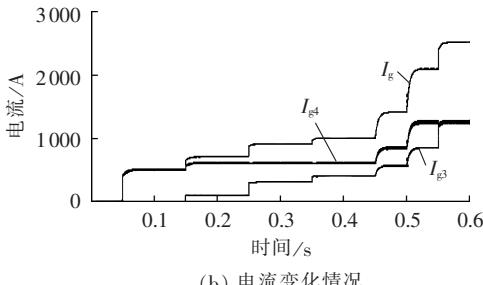
时间/s	I_{w1}/A	I_{w2}/A	时间/s	I_{w1}/A	I_{w2}/A
0	0	0	0.35	400	600
0.05	250	250	0.45	700	700
0.15	300	400	0.50	1250	833
0.25	300	600			

表8 模式3中 K_3 在不同时间段的变化情况
Table 8 K_3 for different time periods in mode 3

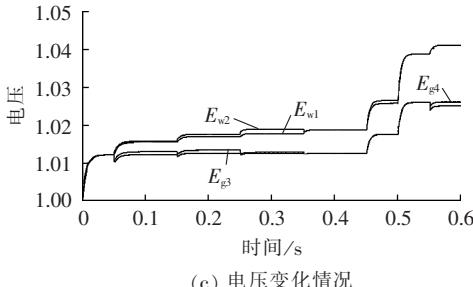
时间段/s	K_3	时间段/s	K_3
0.05~0.15	无穷大	0.35~0.50	15.55
0.15~0.25	67.02	0.50~0.55	10.81
0.25~0.35	21.54	0.55~0.6	9.97



(a) 0.15~0.60 s 下垂系数变化情况



(b) 电流变化情况



(c) 电压变化情况

图16 模式3风速突变仿真结果

Fig.16 Simulative results of wind speed mutation in mode 3

1250 A。电压值也随电流的变化而变化,根据图16(b)可看出其电流变化与理论分析完全一致。

为了更形象地说明协调下垂控制策略的优点,针对表7所示的WFVSC输出电流情况,研究了不采用下垂控制时的功率传输特性。由于没有采用下垂控制($K_3=K_4=0$),根据式(7)、(8)可知,GSVSC3和GSVSC4的电流传输比例始终与输电线路的电阻呈反比,即:

$$\frac{I_{g3}}{I_{g4}} = \frac{R_4}{R_3} \quad (18)$$

此时根据式(7)可知,直流电压 E_{g3} 和 E_{g4} 等于空载电压,此时GSVSC采用 $U_{dc}-P$ 的控制策略,共同控制直流电压的稳定。风速随机变化且不采用协调下垂控制时,GSVSC电流传输特性及电压变化曲线如图17所示。

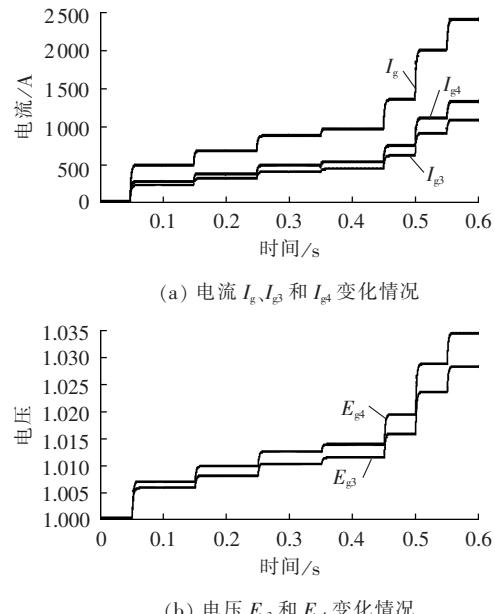


图17 无协调下垂控制时仿真结果

Fig.17 Simulative results, without coordinated droop control

图17的仿真结果表明,如果不加入协调下垂控制,多端直流输电系统会按照相同的比例一直输送,如果不加以控制,可能会导致流过GSVSC的电流过大,造成GSVSC长期过载运行,影响换流器的使用寿命。电压仿真结果表明, $U_{dc}-P$ 的控制策略可以稳定各GSVSC端的直流电压。

3.3 风速随机变化时的仿真结果与分析

3.3.1 模式1仿真结果

仿真模型参数设置与风速突变时仿真模型参数一致。图18为风速随机变化时下垂控制常数 K_3 、电流、电压变化曲线,可以看出在0.21~0.31 s以及0.42~0.50 s 2个时间段内,GSVSC3和GSVSC4同时承担传输风电功率的作用,而其余时间电流全部流过GSVSC4。

3.3.2 模式2仿真结果

风速随机变化规律与模式1相同。VSC-MTDC系统中下垂控制常数 K_3 、电压、电流变化曲线如图19所示。由仿真结果可知,在0.49~0.50 s、1.75~1.80 s、3.6~3.7 s之间风电场发出的有功功率较大,使得输出总电流较大,因此下垂系数 K_3 减小,系统中各VSC的电压、电流随之变化,可以看出其仿真结果与理论分析一致。

3.3.3 模式3仿真结果

风速随机变化时,模式3的仿真结果见图20。

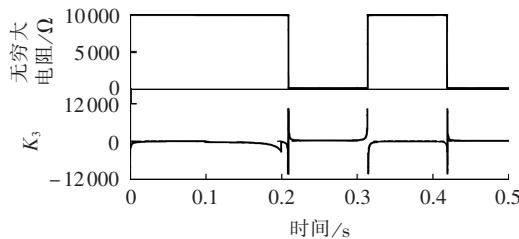
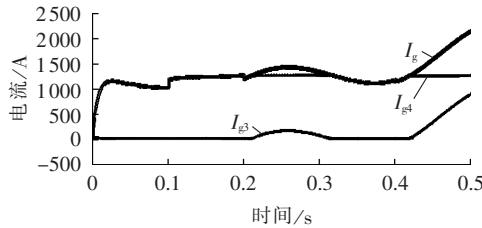
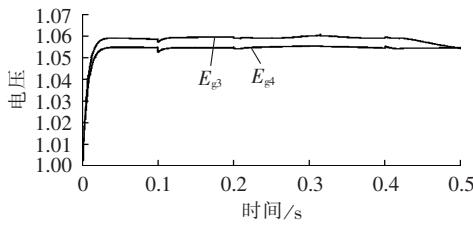
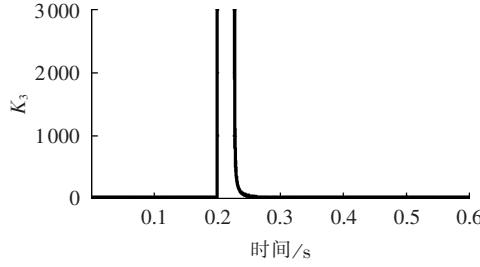
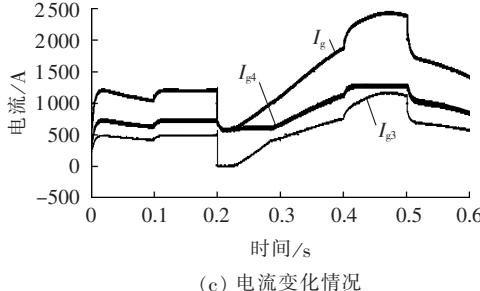
(a) 无穷大电阻和下垂常数 K_3 变化情况(b) 电流 I_g 、 I_{g3} 和 I_{g4} 变化情况(c) 电压 E_{g3} 和 E_{g4} 变化情况

图 18 模式 1 中风速随机变化仿真结果

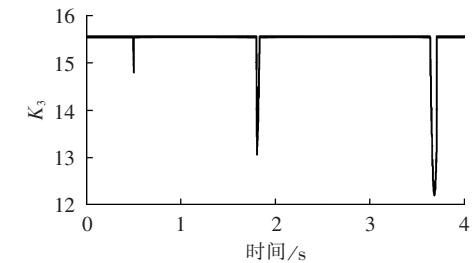
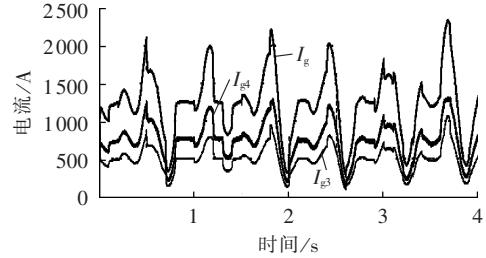
Fig.18 Simulative results for random wind speed change in mode 1



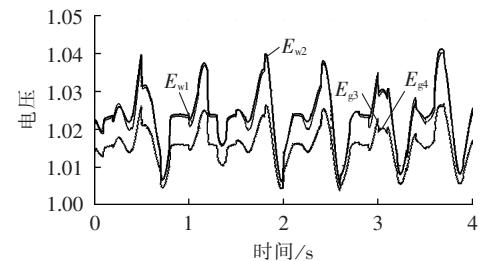
(a) 下垂系数变化情况



(c) 电流变化情况

(a) 下垂常数 K_3 变化情况

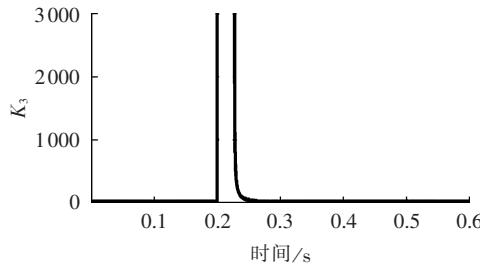
(b) 电流变化情况



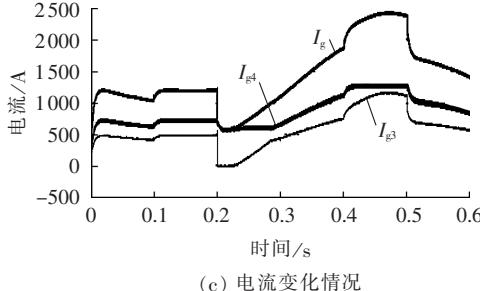
(c) 电压变化情况

图 19 模式 2 中风速随机变化仿真结果

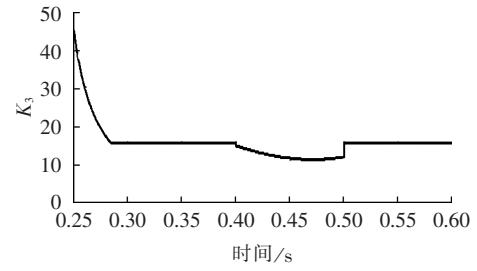
Fig.19 Simulative results for random wind speed change in mode 2



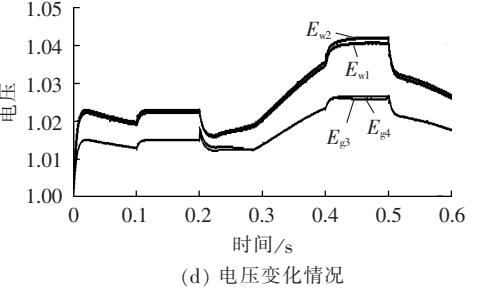
(a) 下垂系数变化情况



(c) 电流变化情况



(b) 0.25~0.6s 下垂系数变化情况



(d) 电压变化情况

图 20 模式 3 中风速随机变化仿真结果

Fig.20 Simulative results for random wind speed change in mode 3

由图 20 可知,在 0.4~0.5 s 时间段 GSVSC 工作于模式 2,此时下垂系数 K_3 减小,相应的电流 I_{g3}/I_{g4} 增大,电压也随之变化。

同理,对风速随机变化时不采用协调下垂控制的 VSC-MTDC 系统进行研究,海上风电场输出的总

电流 I_g 与上述 3 种模式仿真参数相同。得到 GSVSC 电流传输特性如图 21 所示。

由图可知,同样地,如果不采用协调下垂控制策略,GSVSC3 和 GSVSC4 会一直按照一定的比例输送风电功率,然而当风电功率较大时,也会造成某一换

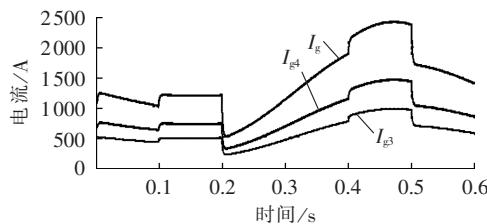


图 21 无下垂控制时的电流变化曲线
Fig.21 Current curves,without coordinated droop control

流器过载运行,如图 21 中在 0.4~0.5 s 时间段,流过 GSVSC4 的电流甚至达到了 1500 A,超出采用协调下垂控制时设定的 1250 A,因此可以看出协调下垂控制策略还有利于换流器的安全稳定运行。

3.4 仿真结果对比分析

受端换流站的协调下垂控制可降低 VSC-MTDC 系统的运行损耗,实现 VSC-MTDC 系统中有功功率的最优分配。对比 3 种控制模式的仿真结果可以得出以下结论:模式 1 适用于 GSVSC4 作为主换流站,而 GSVSC3 作为备用换流站的情况,当风电场输送功率较大时,GSVSC3 实现分担有功功率的作用;模式 2 适用于 2 条线路按照相应比例分配输送有功功率的情况,最大限度地减少了有功功率损失;模式 3 主要用于风电出力波动较大的情况,将模式 1 和模式 2 相结合,在 2 条线路共同输送功率时实现最优功率分配。

4 结论

本文提出了一种基于 VSC-MTDC 的大规模海上风电并网系统的协调下垂控制方法。针对风电出力波动的特点制定了 3 种控制模式以实现多换流器之间的协调运行。此外分析了 3 种控制模式的工作原理,并利用协调下垂控制方法分别计算了 3 种控制模式下的下垂系数。最后,在 MATLAB/Simulink 中建立了四端 VSC-MTDC 系统仿真模型,分别研究了 3 种控制模式下风速突变以及风速随机变化时,含大规模海上风电场的 VSC-MTDC 系统功率传输情况。仿真结果表明,当海上风电场输出的直流电流较小时,仅通过其中的一个换流站传输风电功率以避免引起不必要的损耗,当风电场输出的直流电流超过单个换流站允许通过的最大功率时,通过对 GSVSC 的协调下垂控制,可以最大限度地减少输电系统的传输损耗,从而实现风电功率的最优传输。此外通过对受端换流站的协调下垂控制还可以稳定直流电压,增强 VSC-MTDC 系统的运行稳定性。本文的研究对于 VSC-MTDC 系统的协调优化运行以及提升大规模风电的消纳水平具有一定的科学意义。

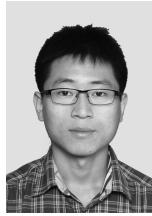
参考文献:

- [1] PERVEEN R,KISHOR N,MOHANTY S R. Off-shore wind farm development:present status and challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2014(29):780-792.
- [2] CHEN Z,BLAABJERG F. Wind farm:a power source in future power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2009,13(6):1288-1300.
- [3] CHOY Chihju,WU Yuankang,HAN Giayo,et al. Comparative evaluation of the HVDC and HVAC links integrated in a large offshore wind farm—an actual case study in Taiwan[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2012,48(5):1639-1648.
- [4] HE Lina,LIU Chencheng,ANDREA P,et al. Distance protection of AC grid with HVDC-connected offshore wind generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(2):493-501.
- [5] 李逸超,孙国强,杨义,等.含经 VSC-HVDC 并网海上风电场的交直流系统概率最优潮流[J].电力自动化设备,2015,35(9):136-142.
LI Yichao,SUN Guoqiang,YANG Yi,et al. Probabilistic optimal power flow of AC/DC system with offshore wind farm connected to grid via VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(9):136-142.
- [6] LIU Hanchao,SUN Jian. Voltage stability and control of offshore wind farms with AC collection and HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2014,2(4):1181-1189.
- [7] 孙蔚,姚良忠,李琰,等.考虑大规模海上风电接入的多电压等级直流电网运行控制策略研究[J].中国电机工程学报,2015,35(4):130-132.
SUN Wei,YAO Liangzhong,LI Yan,et al. Study on operation control strategies of DC grid with multi-voltage level considering large offshore wind farm grid integration[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(4):130-132.
- [8] SILVA B,MOREIRA C L,SECA L,et al. Provision of inertial and primary frequency control services using offshore multiterminal HVDC networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2012,3(4):800-808.
- [9] RODRIGO T P,PAVOL B,SILVIO F R,et al. A novel distributed direct-voltage control strategy for grid integration of offshore wind energy systems through MTDC network [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(6):2429-2441.
- [10] LIANG Jun,JING Tianjun,ORIOL G B,et al. Operation and control of multiterminal HVDC transmission for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26 (4):2596-2604.
- [11] XU L,YAO L Z. DC voltage control and power dispatch of a multi-terminal HVDC system for integrating large offshore wind farms[J]. IET Renewable Power Generation,2010,5(3):223-233.
- [12] PINTO R T,BAUER P,RODRIGUES S F,et al. A novel distributed direct voltage control strategy for grid integration of offshore wind energy systems through MTDC network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(6):2429-2441.
- [13] JEF B,STIJN C,RONNIE B. Modeling of multi-terminal VSC HVDC systems with distributed DC voltage control [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(1):34-42.
- [14] 喻峰,王西田,解大.多端柔性直流下垂控制的功率参考值修正方法[J].电力自动化设备,2015,35(11):117-122.
YU Feng,WANG Xitian,XIE DA. Power reference correction method for droop control of VCS-MTDC system [J]. Electric

- Power Automation Equipment,2015,35(11):117-122.
- [15] 付媛,王毅,张祥宇,等.多端电压源型直流系统的功率协调控制技术[J].电力自动化设备,2014,34(9):130-136.
- FU Yuan,WANG Yi,ZHANG Xiangyu,et al. Coordinated power control of VSC-MTDC system [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):130-136.
- [16] DIERCKXSENS C,SRIVASTAVA K,REZA M,et al. A distributed DC voltage control method for VSC MTDC systems[J]. Electric Power System Research,2012(82):54-58.
- [17] ABDEL-KHALIK A S,MASSOUD A M,ELSEROUGI A A,et al. Optimum power transmission-based droop control design for multi-terminal HVDC of offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(3):3401-3409.
- [18] XU L,YAO L,BAZARGAN M. DC grid management of a multi-terminal HVDC transmission system for large offshore

wind farms[C]//International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Nanjing,China:IEEE,2009:1-7.

作者简介:



彭衍建

彭衍建(1988—),男,山东济宁人,博士研究生,主要研究方向为风电场并网稳定性控制(**E-mail**:yjpeng1989@gmail.com);

李勇(1982—),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统优化与控制、电能质量分析与控制(**E-mail**:yongli@hnu.edu.cn);

曹一家(1969—),男,湖南益阳人,副校长,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统优化与控制、智能控制系统与决策(**E-mail**:yjcao@hnu.edu.cn)。

Coordinated droop control for large-scale offshore wind farm grid-connected based on VSC-MTDC system

PENG Yanjian,LI Yong,CAO Yijia

(College of Electrical and Information Engineering,Hunan University,Changsha 410082,China)

Abstract: It is especially essential for large-scale offshore wind farm to improve the transmission power and efficiency of VSC-MTDC systems. A coordinated droop control method for the grid side's converters is proposed, and then, three typical control modes are made to realize the optimal transmission of the active power, which is generated from the large-scale wind farms. Thus, the transmission efficiency of VSC-MTDC can be improved effectively. A 4-terminal VSC-HVDC model is carried out in MATLAB/Simulink to prove the proposed three control modes respectively. The simulation results show that the proposed control modes can achieve the coordination distribution of the active power, stabilize the DC voltage and improve the operation stability of the VSC-MTDC system.

Key words: VSC-MTDC; offshore wind farm; droop control; active power distribution; wind power; grid-connection

(上接第15页 continued from page 15)

Performance analysis and monitoring based on SCADA data and Gaussian process regression for wind turbine power generation

GUO Peng,JIANG Manli,LI Hangtao

(School of Control and Computer Engineering,North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: According to the operational theories of wind turbine and based on the SCADA data, the major influencing factors of its power generation performance are analyzed, including the environmental factors and the operating conditions of wind turbine components, such as pitch system, yaw system and control system. Gaussian process regression is applied in the construction of power generation performance model to adapt to the high randomness and strong noise of wind turbine operating data. The constructed model describes the relationship between the wind power utilization coefficient and its influencing factors, which is applied to monitor the abnormal change of wind turbine power generation performance in real time by analyzing the residual of model prediction with the real time operating data as the model inputs. The feasibility of the proposed method is verified by the simulation based on the actual operating data of a wind farm.

Key words: wind turbines; power generation performance; monitoring; wind power utilization coefficient; Gaussian process regression; SCADA data